

# 中国规范抗震设计调整在 CSI 程序中的实现

筑信达 李立

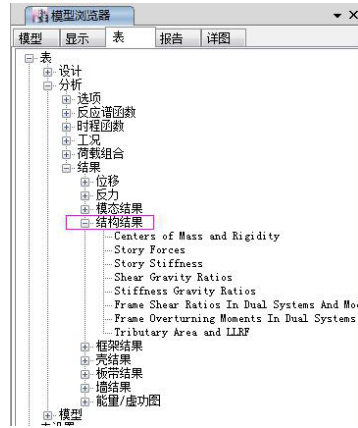
为了保障建筑结构的抗震能力，我国的结构设计规范在地震作用大小、多道防线设置、构件设计内力等方面进行了一系列的规定。这些规定大多涉及到地震力、构件内力的调整，我们在实现软件相关设计功能时，把这些规定统称为“抗震设计调整”。对于 ETABS、SAP2000 而言，“抗震设计调整”主要分两个层次：1) 局部调整。当某些要求和条件不满足时，整个结构的水平地震剪力或者是某些层的水平地震剪力将要进行调整；2) 构件调整。这是在构件配筋之前进行的内力调整，以满足“强剪弱弯”、“强柱弱梁”等要求。本文将详细介绍这些调整功能在程序中的实现，ETABS 会自动执行所有调整要求。而 SAP2000 作为通用的结构分析设计软件，没有内置“层”概念，故部分依赖于“层”的调整功能在 SAP2000 中不能自动实现。在下文的介绍中，主要以 ETABS 为例，但也会说明 SAP2000 的异同。

ETABS 提供结构总信息（见图 1，命令路径：设计 > 结构总信息），在进行结构分析之前，应检查并设置结构总信息的各项参数。这里的很多参数都与“抗震设计调整”相关，下文将反复引用该图。SAP2000 没有结构总信息命令，部分功能体现在设计首选项中。



项	值
01 结构体系	框架
02 楼层刚度	楼层地震力位移
03 框架承担的剪力矩	规范方法
04 结构重要系数 $\gamma_0$	1
05 活荷载使用年限调整系数 $\gamma_{L1}$	1
06 超越系数	1.1
07 性能水准	常规设计
08 混凝土楼面梁刚度的自动放大	否
09 高层建筑?	是
10 场地类型	I类
11 不规则层调整系数	1.25
12 框剪结构的剪力调整系数 Max SMF	2
13 塔?	T1
14 楼层号	NONE
15 嵌固层号	NONE
16 转换层号	NONE
17 裙房顶层号	NONE
18 楼层分段数	1
19 楼层段底层号 [1]	Story1
20 不规则层数	0

图1 ETABS 结构总信息



模型浏览器

- 设计
- 分析
  - 选项
  - 反应谱函数
  - 时程函数
  - 工况
  - 荷载组合
  - 结果
    - 位移
    - 反力
    - 模态结果
    - 结构结果
      - Centers of Mass and Rigidity
      - Story Forces
      - Story Stiffness
      - Shear Gravity Ratios
      - Stiffness Gravity Ratios
      - Frame Shear Ratios In Dual Systems And Mo...
      - Frame Overturning Moments In Dual Systems
      - Tributary Area and LLRF
- 框架结果
- 壳结果
- 板带结果
- 墙结果
- 能量/虚功图

图2 控制指标结果输出

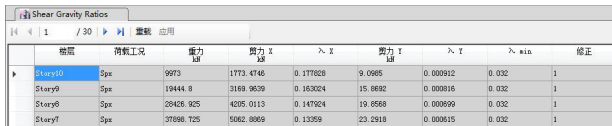
## 1 局部调整

局部调整包含规范中的这些规定：剪重比要求、结构层间刚度比要求、二道防线剪力调整要求、重要构件内力调整。其中，剪重比、层刚度、框架承担最小地震剪力调整等结果包含在 ETABS “结构结果” 的表格输出中，可通过模型浏览器直接点击查看（见图 2）。

### 1.1 剪重比

当结构完成计算分析后，即可查看剪重比结果，见图 3。程序按照规范要求（GB50011-2010 5.2.5）输出每层的楼层剪力、重力荷载代表值、计算剪重比、最小剪重比（楼层最小地震剪力系数）、修正系数等信息。若修正系数等于 1，代表满足剪重比要求。若修正系数大于 1，则代表不满足要求，这时需要工程师判断下一步的措施，可以优化结构方案，或者增大地震作用再次分析。

注意，ETABS 目前默认是按照地震烈度和结构基本周期依据 GB50011-2010 表 5.2.5 来判断最小剪重比的取值。后续版本将在结构总信息中增加“扭转效应是否明显”一项，以满足按“扭转效应明显”取值的需求。



楼层	荷载工况	剪力 $V$	重力 $G$	$V/G$	$V_{min}/G$	修正		
Story5	Spx	9973	1773.4746	0.177828	9.0965	0.009912	0.032	1
Story6	Spx	19444.8	3189.9639	0.163024	15.6692	0.009916	0.032	1
Story8	Spx	38426.825	4205.0113	0.147924	19.6568	0.009699	0.032	1
Story7	Spx	37696.725	5062.9869	0.13359	23.2918	0.009615	0.032	1

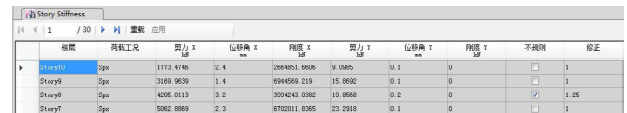
图3 ETABS 剪重比结果输出

注意，SAP2000 对此项不进行自动判断。

### 1.2 层刚度比

高规（JGJ3-2010）对相邻楼层的侧向刚度有明确的要求，楼层的侧向刚度比的计算方法与结构体系有关。在 ETABS 结构总信息的设置中，第 2 项即侧向刚度的计算方法（见图 1）。程序根据这里的设置计算层刚度比，并自动按 JGJ3-2010 3.5.2 判断层刚度比是否满足要求，对于不满足要求的楼层，自动将其地震作用效应乘以 1.25 的增大系数。在输出的层刚度结果表格中，将显示每个地震工况下每层的刚度、

规则性判断和修正系数（见图 4）。该表格里同时输出 X、Y 两个方向，用户关注与地震作用相同方向的结果即可。注意，ETABS 目前不计算层间受剪承载力。若遇到程序不能自动判断的不规则楼层，用户也可以自行指定不规则楼层，甚至自行修改放大系数 1.25，通过结构总信息第 20 项和第 11 项进行设置即可（见图 1）。ETABS 将针对所有自动判断的和用户指定的不规则楼层进行地震作用调整。



楼层	荷载工况	剪力 X $V_x$	层刚度 X $K_x$	剪力 Y $V_y$	层刚度 Y $K_y$	修正
Story5	Spx	1773.4746	0.177828	15.6692	0.009912	1
Story6	Spx	3189.9639	1.4	15.6692	0.1	1
Story8	Spx	4205.0113	3.2	10.8668	0.2	1.25
Story7	Spx	5062.9869	2.3	23.2918	0.1	1

图4 ETABS 层刚度结果输出

注意，SAP2000 对此项不进行自动判断。

### 1.3 二道防线剪力调整

为了达到多道防线的概念设计要求，确保作为第二道防线的框架具有足够的抗侧能力，规范明确了关于框架承担的最小地震剪力的要求。ETABS 结构总信息（图 1）中第 1 项“结构体系”的选择就与该项调整相关，涉及该调整的结构体系包括：框架-剪力墙、框架-核心筒、筒中筒、板柱-剪力墙、钢框架-核心筒、钢框架-支撑。对应的规范条文详 JGJ3-2010 8.1.4、9.1.11、11.1.6 和 GB 50011-2010 6.6.3-1、8.2.3-3。只要选定这类结构体系，ETABS 将自动按上述规范要求验算、调整框架部分承担的地震剪力。同样按图 2 的方式查询结果，详细数据见图 5。表中  $V_p/V_f$  即框架承担地震剪力的调整系数，简称 SMF，该系数同样会出现在框架构件的设计覆盖项中（即图 6 第 5 项、图 7 第 4 项），这代表允许用户修改此系数。若用户通过设计覆盖项修改了部分构件的 SMF，程序会自动按新 SMF 值更新相应构件的设计结果。此外，结构总信息第 12 项“Max SMF”即指定 SMF 的上限值，用于避免特殊情况下自动计算的 SMF 值过大。此外，对于框架柱数量从下至上分段有规律变化的结构，用户可通过结构总信息第 18 项及其子项来设置结构分段，程序自动分段调整框架部分承担的地震剪力。

楼层	转换工况	节段	方向	V <sub>y</sub> / V <sub>E</sub>	V <sub>x</sub> / V <sub>E</sub>	V <sub>z</sub> / V <sub>E</sub>	V <sub>E</sub> / V <sub>E</sub>
Story9	Spe	1	X	8015.781	1338.4055	1603.1562	1.197632
Story8	Spe	1	X	8015.781	1428.7047	1603.1562	1.122105
Story7	Spe	1	X	8015.781	1679.4844	1679.4844	1
Story6	Spe	1	X	8015.781	1682.613	1682.613	1

图5 ETABS 框架承担地震剪力调整结果输出

注意，SAP2000 对此项不进行自动判断。但是 SAP2000 提供相同的设计覆盖项，用户可在覆盖项中指定 SMF 数值，以实现框架构件地震作用效应的调整，从而达到满足框架承担的最小地震剪力的要求。

### 1.4 重要构件内力调整

这里的重要构件指转换构件，具体内容包括：1) 转换梁等转换构件在水平地震作用下内力放大 (JGJ 3-2010 10.2.4)；2) 转换柱在地震作用下轴力放大 (JGJ 3-2010 10.2.11、3.10.4)；3) 部分框支剪力墙结构中框支柱承担地震剪力调整 (JGJ 3-2010 10.2.17) 等。只要用户指定了转换构件属性，ETABS 将自动按以上规范要求实现内力调整。转换构件属性是通过设计覆盖项来指定的，图 6 第 10 项即指定转换梁，可实现 1)；图 7 第 10 项“转换柱类型”包括非转换柱、转换柱、框支柱，选择后两项可分别实现 2)、3)。指定转换构件后，可以发现图 6、7 中的弯矩放大系数、剪力放大系数、轴力放大系数将发生相应的变化。



项	值
01 单元截面类型	B700X300C30
02 抗震设计等级	二级
03 抗震构造等级	不改变
04 耗能构件?	是
05 框剪结构剪力调整系数(SMF)	1.854094
06 弯矩放大系数 MMF - 梁	1
07 剪力放大系数 SMF - 梁	1.2
08 轴力放大系数 AFMF - 梁	1
09 Live Load Reduction Factor	1
10 转换梁?	否
11 梁重力荷载调整系数	0.85
12 扭矩调整系数	1
13 抗震附加纵筋与箍筋增强比(%)	1
14 箍筋的混凝土保护层	30

图6 钢筋混凝土框架梁设计覆盖项



项	值
01 单元截面类型	C600X600C30
02 抗震设计等级	二级
03 抗震构造等级	不改变
04 框剪结构剪力调整系数(SMF)	1.575689
05 弯矩放大系数 MMF - 柱顶	1.2
06 弯矩放大系数 MMF - 柱底	1.2
07 剪力放大系数 SMF - 柱	1.44
08 轴力放大系数 AFMF - 柱	1
09 Live Load Reduction Factor	1
10 转换柱类型	非转换柱
11 柱位置	非主梁柱
12 无支锚长度系数(柱)	转换柱
13 无支锚长度系数(次)	框支柱
14 有效长度系数(柱)	0.766667
15 有效长度系数(次)	1.25

图7 钢筋混凝土框架柱设计覆盖项

SAP2000 的设计覆盖项具有相同的选项，对此的处理方式与 ETABS 一样。

## 2 构件调整

构件的内力调整是有目的地增大构件内力设计值，体现“强柱弱梁”、“强剪弱弯”的设计概念。规范对钢筋混凝土框架梁、框架柱、墙肢、连梁都提出了内力调整的要求。内力调整与抗震等级密切相关，程序中，用户通过“设计首选项”分别设定框架、剪力墙的抗震设计等级，如果局部构件的抗震等级与整体结构不同，可以通过设计覆盖项修改(图 6、7、8、9 中第 2 项)。

### 2.1 框架梁

框架梁只有剪力调整 (GB 50011-2010 6.2.4)，一、二、三级框架梁端剪力增大系数分别是 1.3、1.2、1.1。例如图 6 中，对于二级框架梁(第 2 项)，剪力放大系数为 1.2(第 7 项)。一级框架结构和 9 度的一级框架梁要基于实配的正截面抗震受弯承载力来调整设计剪力，这里引入了实配钢筋面积和材料强度标准值，程序对此的处理办法是：由用户指定超强系数(图 1 第 6 项，默认值 1.1)近似考虑实配钢筋面积放大，内置增大系数 1.1 近似考虑材料强度标准值的影响。另外，JGJ 3-2010 3.10.3 指出，特一级框架梁剪力增大系数应增大 20%，程序的处理办法是在一级的基础上增大 20%。故当抗震设计等级为特一级时，图 6 第 7 项的默认值是  $1.3 \times 1.2 = 1.56$ 。

综上，框架梁的内力调整系数可归纳如下表。表中为程序默认值，用户可通过设计覆盖项进行修改。

表1 框架梁内力调整系数

构件类型	抗震等级 SDG	弯矩增大系数	剪力增大系数
梁	Super I	1.0	$1.3 \times 1.2 = 1.56$
	一级框架结构 9度一级框架	1.0	$1.1 \times 1.1 \times \lambda_s = 1.21 \times \lambda_s$
	I	1.0	1.3
	II	1.0	1.2
	III	1.0	1.1

对于框架梁的内力调整，SAP2000 与 ETABS 的处理方式一样。

### 2.2 框架柱

框架柱的柱端的弯矩调整是以节点为对象，基于节点处左右梁端的弯矩设计值之和进行放大。一根柱与两个节点相连，节点位置会影响调整系数的取值，所以图 7 中柱的弯矩增大系数有两个(第 5、6 项)，区分了柱顶和柱底。根据规范要求，影响柱端弯矩增大系数的因素很多，现将这些因素以及对应的规范条文和程序的处理方式列于下表。

表 2 框架柱内力调整影响因素及处理方式

影响因素	说明	相关规范条文	程序处理方式
楼层位置	区分顶层、中间层、底层	GB 50011-2010 6.2.2、6.2.3 JGJ 3-2010 10.2.11-3	自动识别
结构体系	框架结构有特别要求	GB 50011-2010 6.2.3	用户在结构总信息设置，程序据此判断
轴压比	区分大于或小于 0.15 两种情况	GB 50011-2010 6.2.2	自动计算、判断
是否框支柱、转换柱	对转换构件的特别要求	JGJ 3-2010 10.2.11-3	用户在设计覆盖项设置，程序据此判断
是否角柱	对角柱的特别要求	GB 50011-2010 6.2.6	自动识别，用户也可在设计覆盖项修改

框架柱的剪力是基于调整后的柱弯矩设计值再次调整，所以在程序中，柱的剪力增大系数是其“弯矩增大系数”与“规范中规定的剪力增大系数（GB 50011-2010 6.2.5）”的乘积。以图 7 为例，柱的弯矩增大系数是 1.2，该例是框剪结构、二级，规范给出的剪力增大系数是 1.2，所以第 7 项即  $1.2 \times 1.2 = 1.44$ 。如果柱顶、柱底的弯矩增大系数不同，程序将取大值。

对于特一级、一级框架结构和 9 度的一级框架柱的规定，程序的处理方式与框架梁类似，这里不再赘述。

在 SAP2000 中，“楼层位置”和“结构体系”分别在设计覆盖项、首选项中定义，所以 SAP2000 仍然可以跟 ETABS 一样自动完成框架柱的内力调整。

### 2.3 墙肢连梁

墙肢截面的内力调整要区分是否底部加强区、是否短肢剪力墙、是否部分框支剪力墙等情况。程序会自动判断，但建议用户通过墙肢设计覆盖项检查(图 8 第 3、4、5 项)。程序对底部加强区的判断与结构总信息中的设置有关，图 1 中第 14、15、16、17 项都用于判断底部加强区，即用户要根据实际情况指定首层、嵌固层、转换层、裙房顶层的位置。注意这里的“嵌固层”只用于判断底部加强区，不会对结构模型产生额外的约束作用。

连梁只有剪力调整，程序按规范取值，处理方式与框架梁类似。



图 8 墙肢设计覆盖项



图 9 连梁设计覆盖项

注意，SAP2000 没有剪力墙的设计功能。

## 3 小结

“抗震设计调整”是按中国规范进行结构设计的重要内容，也是程序设计功能的重要部分。总体而言，程序是通过“结构总信息”（仅 ETABS）和“设计首选项”来设置结构整体性的设计信息，通过“设计覆盖项”来设置构件的设计信息。这些设置既有符合常规情况的默认值，又能够被用户修改，使得工程师能干预设计过程，更灵活地解决实际工程问题。

更多与中国规范相关的细节信息，用户可查阅 ETABS 程序附带的技术文档——中国设计手册（图 10）。



图 10 ETABS 技术文档